تحلیل احتمالاتی نشست آنی شالوده‌ی مستطیلی بااستفاده از نرم‌افزارهای مختلف قابلیت اعتماد*

هادی فتاحی[۱] فاطمه جیریایی شراهی[۲] سام مهرنیا [۳]

چکیده بررسی نشست در پی‌های سطحی با برعهده داشتن وظیفه‌ی انتقال نیروهای سازه به زمین، یکی از عوامل مهم در طراحی سازه‌ها می‌باشد. پارامترهای خاک به‌دلیل ماهیت غیرهمگن آن، دارای عدم قطعیت‌های زیادی هستند که صرف نظر کردن از آن‌ها در تخمین میزان نشست، ایراداتی را در تحلیل پایداری سازه وارد می‌کند. ازاین‌رو، امروزه استفاده از روش‌های قابلیت اعتماد با توانایی پذیرفتن عدم قطعیت‌ها و تحلیل پایداری مورد اطمینان مسائل ژئوتکنیکی، مورد استقبال قرار گرفته‌اند. در این تحقیق به‌منظور تخمین احتمال شکست ناشی از نشست آنی یک شالوده‌ی مستطیلی سطحی، از روش‌های مرتبه اول و مرتبه دوم قابلیت اعتماد و هم‌چنین شبیه سازی مونت‌کارلو کمک گرفته شد و تحلیل‌های مربوط به آن در نرم‌افزارهای RT و Risk@انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده، حاکی از بالا بودن احتمال شکست مربوط به نشست شالوده (۹/۵٪) است. روش‌های مرتبه دوم و شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌دلیل خطی نبودن رویه‌ی حالت حدی، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند. به‌علاوه تحلیل حساسیت متغیرهای تصادفی براساس بردارهای اهمیت نشان داد که بار وارد شده بر شالوده نقش مهمی در احتمال شکست دارد و پس از آن ضریب پواسون متغیرتصادفی بااهمیتی است.

واژه‌های کلیدی احتمال شکست، نرم‌افزار RT، نرم‌افزار Risk@، نشست پی‌های سطحی.

Probabilistic Analysis of Immediate Settlement of a Rectangular Foundation Using Various Reliability Software

H. Fattahi F. Jiryaee S. Mehrnia

Abstract *Study of immediate settlement of a rectangular foundation with the task of transferring structural forces to the ground, is one of the important factors in the design of structures. Due to its heterogeneous and anisotropic nature, soil parameters have high uncertainties, the omission of which in estimating the settlement of foundation, creates challenges in the analysis of structural stability. Therefore, the use of reliability methods with the ability to accept uncertainties and reliable stability analysis of geotechnical issues are welcomed today. In this study, in order to estimate the probability of failure due to settlement of rectangular foundation, first-order and second-order reliability methods as well as Monte Carlo simulations were used and the relevant analysis were performed in RT and @Risk software. The results indicate a high probability of failure related to the foundation settlement (9.5%). The second-order methods and Monte Carlo simulations provide more accurate results due to the non-linearity of the limit state procedure. In addition, the sensitivity analysis of random variables based on sensitivity vectors showed that the contact stress (q_o), has an important role in the probability of failure, and then the Poisson's ratio is important.*

Key Word Probability of failure, RT software, @Risk software, Surface foundations meeting.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۹/۵/۲۲ و تاریخ پذیرش آن۹۹/۷/۲۷ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

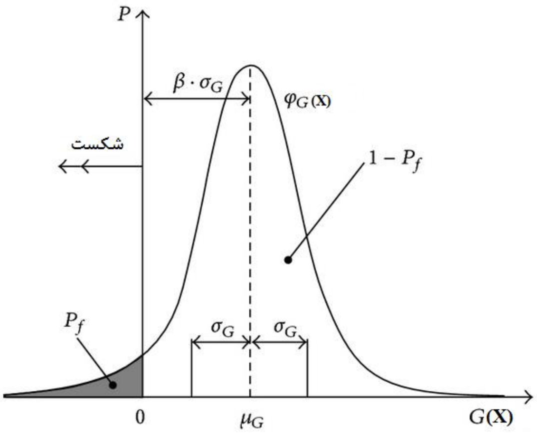
Email: h.fattahi@arakut.ac.ir

(۲) دانش آموخته، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

(۳) دانش آموخته، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

مقدمه

تمامی سازه‌هایی که برروی زمین بنا می شوند، از جمله ساختمان‌ها، پل‌ها و خاکریزها، از دو بخش سازه‌ی فوقانی و سازه‌ی زیرین تشکیل می‌شوند. بخش سازه‌ی زیرین که به‌عنوان پی یا فونداسیون از آن یاد می‌شود، به‌عنوان حائل بین سازه‌ی فوقانی و زمین تکیه‌گاه عمل می‌کند، به‌نحوی که تنش‌های بیش از حد و نیز نشست‌های اضافی ایجاد نشود. در طی فرآیند شکل‌گیری نهشته‌های رسوبی، قبل از هرگونه بارگذاری، ناهم‌سانی ذاتی در خاک‌ها ایجاد می‌شود هم‌چنین در اثر اعمال سربار، به‌علت کرنش‌های ایجاد شده‌ی نا شی از تغییرات تنش، تغییر جهتی در ذرات خاک ایجاد می‌شود، که این امر ناهم‌سانی القایی را ایجاد می‌کند. بیشترین تأثیر این ناهم‌سانی برروی پارامترهای الاستیسیته‌ی خاک است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این پارامترهای الا ستیسیته‌ی خاک، تخمین نشست و برر سی ظرفیت باربری پی‌های سطحی است[1] . عوامل ذکرشده و برخی عوامل دیگر باعث وجود عدم قطعیت در پارامترهای خاک می‌شود که محاسبات و تحلیل‌های قطعی را دچار خطا می‌کند [2]. به‌عبارتی خاک و سنگ از جمله محیط‌هایی هستند که برخی ویژگی‌های آنها در هر دو نقطه از آن متفاوت است و باعث ایجاد ضریب تغییرات می‌شود. دراین صورت چاره‌ای جز یافتن راهی برای ورود عدم قطعیت‌ها نیست. به‌طوری‌که چشم پوشی از آنها، نتایج تحلیل‌ها را از واقیت دور می‌کند و ت صمیم‌گیری در ستی برا ساس آنها انجام نمی شود. در سال‌های اخیر جهشی برای استفاده از نظریه‌های قابلیت اعتماد برای مدل‌کردن عدم قطعیت ها در طرح های مهند سی به‌وجود آمدا ست [3,4]. در طراحی برا ساس قابلیت اعتماد به‌جای استفاده از بردار مقادیر پارامترها به‌صورت قطعی $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$، توزیع آماری آنها درنظر گرفته می‌شود. به‌عبارتی درصورت مشخص بودن توابع چگالی احتمال برای پارامتر های بار و مقاومت، می‌توان از طراحی براساس قابلیت اعتماد استفاده نمود. محاسبه‌ی احتمال شکست برگرفته‌شده از تحلیل قابلیت اعتماد به‌کمک تابع حالت حدی انجام می‌شود. حد تعادلی این تابع ($G(X) = 0$) مرز بین منطقه‌ی ایمن و شکست است [5]. شکل (۱) تابع چگالی احتمال $G(X)$ و چگونگی تفکیک قسمتی از سطح زیر نمودار را به‌عنوان احتمال شکست نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمایی از تعیین احتمال شکست بر توزیع احتمالاتی تابع حالت حدی [6]

پیچیدگی محاسبات احتمال شکست در روش‌های تحلیلی که از تعیین مساحت زیر نمودار و انتگرال بسیار پیچیده منتج می‌شود، سبب شده‌است که در برخی روش ها ا ندیس قابل یت اعت ماد (β) جایگزین این محاسبات پیچیده شود [5].

$$P_f \approx \Phi(-\beta) \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که Φ تابع توزیع تجمعی ا ستاندارد نرمال است. در محاسبه‌ی این اندیس، متغیرها از فضای اصلی خود به فضای استاندارد نرمال انتقال پیدا می‌کنند. اندیس قابلیت اعتماد در روش تحلیلی از طریق محاسبه‌ی ممان‌های مرکزی تابع حالت حدی به‌دست می‌آید. اندیسی که توسط هاسفر و لیند (Hasofer-Lind) مطرح شد و به شرح زیر است [6]:

$$\beta = \min_{X\in F}\sqrt{(X-\mu)^{T}C^{-1}(X-\mu)} \qquad (۲)$$

که در آن X، بردار متغیرهای تصادفی (x_i)، μ بردار میانگین متغیرها، C، ماتریس کوواریانس و F، دامنه‌ی شکست است. در اینجا β از طریق یک مسئله‌ی بهینه سازی به‌دست خواهد آمد. روش ممان‌های آماری مانند روش های مرتبه‌اول و مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد ازجمله روش‌هایی هستند که بااستفاده از اندیس قابلیت اعتماد به تخمین احتمال شکست می‌پردازند.

مطالعاتی که درمورد کاربرد قابلیت اعتماد در برخی مسائل ژئوتکنیکی، در گذشته توسط محققان انجام شده‌است، به شرح زیر است:

بابو و همکارانش تحلیل قابلیت اعتمادی برمبنای محاسبه‌ی فشار مجاز فونداسیون‌های سطحی متکی بر خاک‌های رسی سخت انجام دادند [7].

گریفث و فنتون در سال ۲۰۰۷ با تلفیق تحلیل احتمالاتی و روش اجزای محدود، تراوش آب در زیر سد ها، ظرفیت باربری و نشست پی‌ها و پایداری پایه‌های معدنی را مورد بررسی قرار دادند [8].

فنتون و گریفیث که از پیشگامان بحث قابلیت اعتماد در مهندسی ژئوتکنیک هستند مطالعات متعددی برروی موارد عدم اطمینان در ظرفیت باربری پی‌ها در خاک‌های دانه‌ای و چسبنده انجام داده‌اند. نظریه‌ی اجزای محدود تصادفی از جدیدترین تئوری‌های آنها در سال ۲۰۰۸ می‌باشد که از ترکیب روش اجزای محدود و روش مونت کارلو حاصل شده است [9].

لی و همکاران ، تحلیل قابلیت اعتماد را برروی شکست گوه‌ای توسعه دادند و ارتفاع گوه را تغییر دادند و چهار حالت شکست گوه‌ای را بررسی کردند [10].

سانجی و کیچی در سال ۲۰۰۹ آنالیز قابلیت اعتمادی انجام دادند و روان‌گرایی خاک را براساس داده های آزمایش نفوذ استاندارد مورد بررسی قرار دادند [11].

آقای ناگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ پی‌های سطحی در خاک چسبنده را در شرایط مختلف بارگذاری و شبیه سازی کردند، به‌طوری‌که زاویه‌ی اصطکاک خاک، بارهای افقی و عمودی را به‌عنوان متغیرهایی با توزیع نرمال در مطالعه در نظر گرفتند و تابع عملکرد را با معادله‌ی مایرهوف به‌وجود آوردند. نتایج نشان داد که احتمال شکست در پی‌های سطحی متأثر از تنوع بار عمودی، زاویه‌ی اصطکاک و بار افقی می‌باشد [12].

چینگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ مطالعه‌ی آنالیز قابلیت اعتماد ظرفیت باربری پی‌ها برروی توده‌ی سنگ را بااستفاده از مطالعه‌ی موردی منطقه‌ای در تایوان انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که شاخص مقاومت زمین شناختی سنگ (GIS) و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، دو پارامتر تأثیرگذار هستند [13].

چین لونگ و بک، قابلیت اعتماد شمع‌ها یا المان‌های انتقال بارهای سطحی را به عمق زمین بااستفاده از احتمالات تحلیل کردند [14].

لوانیس و فیلیپ با به کارگیری روش مونت کارلو، پایداری داخلی دیوار خاکی تقویت‌شده را بررسی کردند [15].

جوهری و سبزی، بااستفاده از روش‌های مختلف عددی موفق به پیش‌بینی میزان نشست شالوده شدند و آنالیز قابلیت اعتماد میزان نشست را نیز انجام دادند [16].

نظرزاده و سربیشه تحلیل قابلیت اعتماد شالوده‌ی سطحی را انجام دادند و بر این اساس برای متغیرهای ورودی توابع توزیع احتمالاتی را درنظر گرفتند. آنها در این آنالیز از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده کردند [17].

شکیر ، ظرفیت باربری یک شالوده‌ی مربعی را محاسبه کرد و باا ستفاده از روش مونت کارلو، تابع حالت حدی آن را مدل کرد و به تحلیل احتمالاتی آن پرداخت [18].

در این پژوهش سعی شد بااستفاده از توابع توزیع متغیرهای تصادفی در مسئله‌ی نشست شالوده‌ی مستطیلی سطحی و هم‌چنین روابط تعریف‌شده، یک آنالیز قابلیت اعتماد انجام شود. به‌این‌منظور، از روش های مختلف قابلیت اعتماد مانند روش قابلیت اعتماد مرتبه‌اول، روش قابلیت اعتماد مرتبه‌دوم و

شبیه سازی مونت‌کارلو برای تخمین احتمال شکست و تحلیل حساسیت متغیرهای تصادفی کمک گرفته شد. این تحلیل ها در نرم‌افزار های RT و @Risk که ابزار قدرتمندی برای انجام تحلیل های احتمالاتی هستند صورت گرفت.

روش‌های قابلیت اعتماد به‌کار گرفته‌شده برای تخمین احتمال شکست

روش‌های ارزیابی قابلیت اعتماد که در نهایت به تخمین احتمال شکست سیستم منجر می شوند، به‌طور تقریبی نسبت به روش‌های تحلیلی، هدف خود را دنبال می‌کنند تا به قضاوت درمورد پایداری سیستم‌ها بپردازند. روش مرتبه‌اول قابلیت اعتماد، روش مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد و شبیه‌سازی مونت‌کارلو از جمله‌ی این روش‌ها هستند که به آنها پرداخته خواهد شد.

روش مرتبه‌اول قابلیت اعتماد

تابع حالت حدی در مقدار صفر آن ($G(X) = 0$) که رویه‌ی حالت حدی نام دارد، ممکن است به شکل یک خط راست تا یک منحنی با درجه‌ی بالا باشد. در روش ممان‌های آماری، تخمین حجم احتمال مشترک قرارگرفته در منطقه‌ی شکست، به‌منظور محاسبه‌ی احتمال شکست، با فرض‌هایی نسبت به شکل رویه‌ی حالت حدی انجام می‌شود. در روش مرتبه‌اول، که ترکیبی از روش‌های تحلیلی و تقریبی است، این فرض مبنی بر خطی بودن رویه‌ی حالت حدی می باشد و بااستفاده از بسط درجه‌اول تیلور خطی سازی می شود تا منجر به سادگی محاسبات پیش‌رو شود [4].

$$G(X) \approx G(X^*) + \nabla G(X^*)(X - X^*)^T \qquad (۳)$$

در این رابطه، X بردار متغیرهای تصادفی تبدیل‌یافته به فضای استاندارد نرمال و X^* محتمل‌ترین نقطه بر رویه‌ی حالت حدی است. بنابراین پس از انتقال توابع توزیع مختلف متغیرهای تصادفی به توزیع استاندارد نرمال و محاسبه‌ی شاخص قابلیت اعتماد، احتمال شکست با رابطه‌ی (۱) به‌دست خواهد آمد [4].

روش مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد

در اکثر مواقع تابع عملکردی که به‌عنوان یک متغیر تصادفی وابسته از متغیرهای تصادفی مستقل تأثیر می‌پذیرد، از یک خط راست پیروی نمی‌کند و متناسب با میزان پیچیدگی آن، مطابق با یک منحنی درجه‌دو یا بالاتر است. در روش مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد از رویه‌ی حالت حدی حول محتمل‌ترین نقطه‌ی آن تقریب درجه‌دوم زده می‌شود. به‌عبارتی، به‌جای تقریب زدن رویه‌ی حالت حدی با یک صفحه یا ابرصفحه، با یک سهمی یا ابرسهمی جایگزین می‌شود [4].

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^{n}(x_i - x_i^*)\frac{\partial g}{\partial x_i} + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_i^*)(x_i - x_i^*)\frac{\partial^2 g}{\partial x_i\,\partial x_i} \qquad (٤)$$

که در آن X_i متغیرهای تصادفی و x_i برآمدهای آنها هستند و هم‌چنین x_i^* بیانگر محتمل‌ترین نقطه است. بریتنگ (Breitung) رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی احتمال شکست با تقریب مرتبه‌دوم ارائه داد [4]:

$$P_{f_2} \approx \Phi(-\beta)\prod_{i=1}^{n-1}(1 + \beta k_i)^{-\frac{1}{2}} \qquad (۵)$$

که در آن k_i نشان‌دهنده‌ی انحنای اصلی تابع حالت حدی در نقطه‌ی طراحی است، به صورتی‌که اگر تابع n متغیر داشته باشد، (n-1) انحنا دارد؛ بنابراین نیاز است که این انحناها محاسبه شوند [4].

روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو

روش شبیه‌سازی مونت کارلو ازجمله روش‌های عددی است که در آن هر متغیری به‌طور هم‌زمان، طبق قوانین تعیین‌شده، تغییر می‌کند. ساده‌ترین قانون این است که برای یک تحلیل پایداری داده‌شده، هر متغیر، تنها یک مقدار انتخاب‌شده‌ی تصادفی از توزیع اندازه‌گیری

شده‌اش که مستقل از سایر متغیرها می‌باشد خواهد داشت. سپس رفتار و عمل سیستم که در مقدار تابع حالت حدی نمود پیدا می‌کند به‌إزای این مقادیر انتخاب‌شده محاسبه می‌شود و به‌این‌ترتیب یک آزمون از رفتار سیستم انجام می‌شود. مونت‌کارلو این آزمون‌ها را به تعداد بسیار زیاد تکرار می‌کند به‌طوری‌که توزیع احتمالاتی تابع حالت حدی مشخص شود. به این ترتیب احتمال شکست به‌شکل زیر محاسبه می‌شود [19].

$$P_f \approx \frac{n(G\leq 0)}{N} \qquad (٦)$$

که در آن $n(G \leq 0)$ تعداد آزمون‌هایی است که در آنها $G \leq 0$ است. تعداد آزمون‌ها N متناسب با دقت احتمال شکست مطلوب می‌باشد. از مزایای مهم این روش عدم وجود هیچ محدودیتی در نوع و شکل توزیع احتمالاتی متغیرها و نیز تابع حالت حدی می‌باشد [19].

بردارهای حساسیت

متغیرهای تصادفی، هر کدام به نوعی بر پایداری سیستم و احتمال شکست آن تأثیر می‌گذارند. آگاهی از میزان تأثیرگذاری متغیرها و علاوه‌بر آن یافتن با اهمیت‌ترین آنها، کمک زیادی به طراح و تدارک اقدامات کنترلی برای پایین آوردن احتمال شکست می‌کند. باا ستفاده از ماهیت تغییرپذیری متغیرها می‌توان تأثیر آنها بر شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست را مطالعه کرد. بردارهای حساسیت آلفا، بتا، دلتا، اتا و کاپا از جمله بردارهای حساسیتی هستند که با ارائه‌ی اهمیت متغیرها در قالب یک بردار به مقایسه‌ی متغیرها نسبت‌به یکدیگر می‌پردازند. بردار حساسیت آلفا، اهمیت هریک از متغیرها را براساس سهمی که در محاسبه‌ی واریانس تابع حالت حدی دارد بیان می‌کند. واریانس تابع حالت حدی از این جهت که در محاسبه‌ی احتمال شکست دخیل است بیان‌کننده‌ی این اهمیت است [4].

$$V[\widehat{G}] = \|\nabla G\|^2(\alpha_1^2 + \alpha_2^2+\ldots+\alpha_n^2) \qquad (٧)$$

سهم هر متغیر تصادفی در واریانس تابع حالت حدی به اندازه‌ی α^2، یعنی بردار یکه‌ی آن است. هرچه $|\alpha_i|$ بیشتر باشد بیانگر آن است که اهمیت x_i بالاتر است. علامت α_i نیز در احتمال شکست تأثیرگذار است. مقدار مثبت α نشان می‌دهد با افزایش آن، متغیر P_f افزایش پیدا می‌کند و مقدار منفی بیانگر آن است که با افزایش آن، متغیر P_f کاهش می‌یابد. در بردار حساسیت دلتا تغییرات شاخص قابلیت اعتماد نسبت‌به میانگین متغیرها سنجیده می‌شود. این نشان‌دهنده‌ی اهمیت میانگین متغیرهای تصادفی است [4].

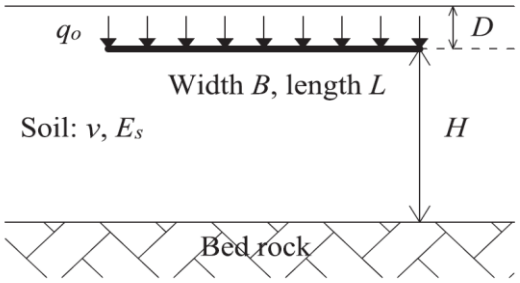
$$\delta_i = \frac{\partial\beta}{\partial\mu_i}\sigma_i \qquad (٨)$$

هم‌چنین در بردار اهمیت اتا، تغییرات شاخص قابلیت اعتماد نسبت‌به پراکندگی متغیرها بررسی می‌شود.

$$\eta_i = \frac{\partial\beta}{\partial\sigma_i}\sigma_i \qquad (٩)$$

نشست آنی شالوده‌ی سطحی

دو نوع نشست اصلی می‌تواند برای شالوده‌های سطحی رخ دهد؛ نخست نشست آنی یا الاستیک و دوم نشست تحکیم. نشست آنی شالوده بلافاصله بعد از احداث شالوده رخ می‌دهد. نشست تحکیم یک نشست تابع زمان می‌باشد و مطابق تئوری تحکیم، علت وقوع آن خروج آب حفره‌ای از میان حفرات خاک به‌علت اضافه‌فشار تحمیل‌شده بر آنها می‌باشد. نشست کلی یک شالوده، مجموع نشست‌های آنی (الاستیک) و تحکیم می‌باشد [20]. از آنجا که در محاسبات مربوط به نشست آنی از پارامترهای الاستیک خاک استفاده می‌شود، به آن نشست الاستیک نیز گفته می‌شود. محاسبات نشست آنی یا کوتاه‌مدت در مورد خاک‌های دانه‌ای و نیز خاک‌های چسبنده با درجه‌ی اشباع کمتر از ۸۰ در صد کاربرد دارد [21]. شکل (۲) ترسیمی از شالوده‌ی مستطیلی سطحی و متغیرهای تأثیرگذار در میزان نشست را نشان می‌دهد.



شکل ۲ ترسیمی از شالوده‌ی مستطیلی سطحی و متغیرهای تأثیرگذار در میزان نشست

معرفی اجمالی نرم‌افزارهای به‌کار گرفته‌شده در این تحقیق

نرم‌افزارهای متعددی قابلیت انجام تحلیل‌های احتمالاتی و ارزیابی ریسک و هم‌چنین آنالیز حساسیت را دارند. در این تحقیق از دو نوع آنها برای انجام تحلیل‌ها کمک گرفته شده‌است. در ادامه به تعریف دو نرم‌افزار RT و @Risk پرداخته خواهد شد.

نرم‌افزار RT

نرم‌افزار RT قابلیت انجام ارزیابی‌های احتمالاتی چون قابلیت اعتماد و ریسک را دارد. پارامترهای سیستم ازجمله متغیرهای تصادفی و قطعی، ورودی‌های این برنامه هستند. در این برنامه امکان استفاده از تعداد زیادی متغیر ورودی و ارزیابی حساسیت و اهمیت آنها نسبت‌به یکدیگر وجود دارد و در آن می‌توان از توزیع‌های مختلفی مانند نرمال، گامبل، بتا، نمایی، لاگ نرمال و رایلی برای تعریف رفتار متغیرها استفاده کرد. انجام شبیه‌سازی مونت کارلو، روش مرتبه‌اول قابلیت اعتماد و روش مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد از دیگر قابلیت‌های برنامه است. با انجام این آنالیزها، مقداری از متغیرها که به‌ازای آنها کمترین احتمال شکست به‌دست می‌آید، برآورد می‌شود. هم‌چنین این برنامه با برنامه‌هایی مانند SAP، ANSYS، Abaqus، OpenSeesو MATLAB می‌تواند لینک شود. این نرم‌افزار را می‌توان به‌صورت رایگان از طریق لینک (inrisk.ubc.ca/software/rt) دریافت کرد.

نرم‌افزار @Risk

نرم‌افزار ریسک یک سیستم نرم‌افزاری قوی درزمینه‌ی تحلیل وضعیت‌های کاری و فنی است که تحت تأثیر ریسک قرار دارند. این نرم‌افزار تکنیک‌های خود را در قالب بسته‌ی نرم‌افزاری صفحه‌گسترده‌ی استاندارد مایکروسافت اکسل ارائه می‌دهد و به‌صورت یک "add-in" برروی اکسل نصب می‌شود. سیستم نرم‌افزار ریسک تمام ابزارهای مورد نیاز برای تعریف مجموعه، اجرا و نمایش نتایج تحلیل ریسک را ارائه می‌دهد و در وضعیت مشابه با منوها و عملگرهای اکسل عمل می‌کند. بااستفاده از نرم‌افزار ریسک و اکسل هر وضعیت ریسکی از تجارت و کسب و کار گرفته تا علوم و فنون مهندسی می‌تواند مدل شود. توزیع‌های احتمالی ارائه‌شده در آن امکان طبقه‌بندی نمودن تقریبا تمامی انواع عدم قطعیت‌ها را در مقادیر سلول‌های صفحه‌گسترده می‌دهد، سپس بااستفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و یا Latin Hypercube و تولید اعداد تصادفی، مدل را بارها اجرا کرده و پارامترهای پروژه را تحلیل می‌کند و درنهایت مقادیر خروجی‌های مشخص‌شده و توزیع احتمال آنها را ارائه می‌کند. این نرم‌افزار به‌منظور انجام سریع‌ترین شبیه‌سازی ممکن و بااستفاده از تکنیک‌های نمونه‌گیری پیشرفته طراحی شده‌است. در هر زمانی که شما با وضعیتی مواجه شدید که می‌بایست یک تصمیم و یا تحلیل همراه با ریسک انجام دهید، نرم‌افزار ریسک می‌تواند به‌منظور بهبود چشم‌انداز تصویر وقایعی که در آینده رخ خواهند داد استفاده شود. پس از ورود متغیرها و تعریف توزیع احتمالاتی آنها برنامه آماده است تا با تولید اعداد تصادفی و بااستفاده از روش‌های احتمالاتی خود مدلی بسازد و برای متغیر خروجی یک توزیع احتمالاتی ارائه دهد. درنتیجه تحلیل‌ها براساس رفتار توزیع ارائه‌شده انجام می‌گیرد. از مزیت‌های این نرم‌افزار تولید شکل‌های گرافیکی پیرامون ورودی‌ها و نتایج است که باعث فهم بهتر و سهولت در تحلیل‌ها می‌شود. این نرم‌افزار قابلیت کاربرد در هر زمینه‌ای را که عدم قطعیت در آن نمایان است دارد.

تحلیل و نتایج

در ادامه به بررسی نشست آنی یک شالوده‌ی انعطاف‌پذیر مستطیلی به‌منظور برآورد ایمنی آن در یک مسئله‌ی ژئوتکنیکی پرداخته خواهد شد. در تحلیل‌های انجام‌شده، روش‌های مرتبه‌اول و دوم قابلیت اعتماد و شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌کار گرفته شده‌است که در نرم‌افزارهای RT و @Risk مدل‌سازی شده‌اند.

مسئله‌ی نشست شالوده‌ی مستطیلی باتوجه به رابطه‌ی زیر شامل متغیرهای تأثیرگذاری است [22] که جدول (۱) به شرح پارامترهای قطعی این مسئله می‌پردازد.

$$\Delta H = 0.5Bq_0 \frac{1-v^2}{E_s} m \left(I_1 + \frac{1-2v}{1-v} I_2\right) I_F \qquad (۱۰)$$

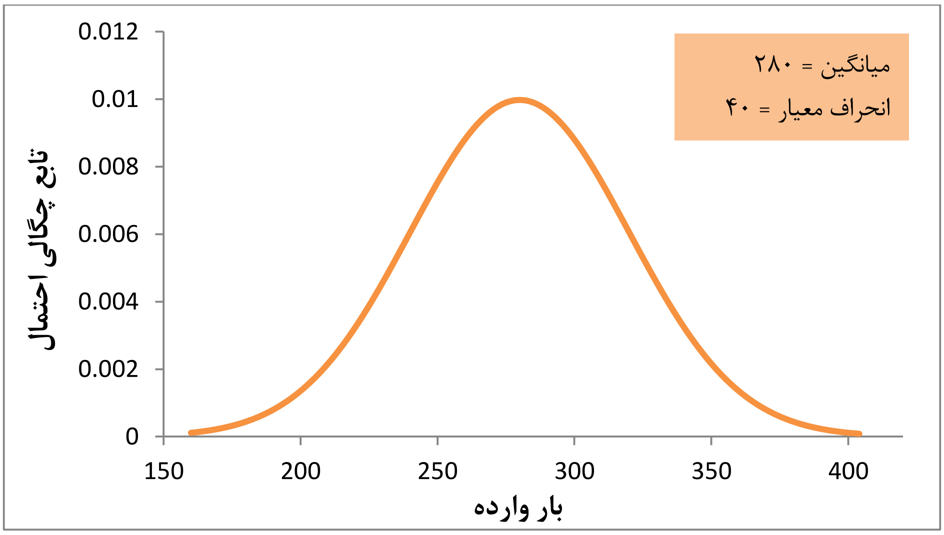
برخی از این متغیرها به‌دلیل وجود عدم قطعیت بالای ویژگی های ژئوتکنیکی، به‌عنوان متغیرتصادفی درنظر گرفته‌شده‌اند. جدول (۲) بیانگر پارامترهای احتمالاتی متغیرهای تصادفی می‌باشد. به‌علاوه شکل‌های (۳) تا (۵) توزیع احتمالاتی متغیرهای تصادفی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، متغیرهای بار وارده، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته به‌عنوان متغیرهای تصادفی غیروابسته با توزیع نرمال فرض شده‌اند.

جدول ۱ پارامترهای قطعی و مقادیر آنها

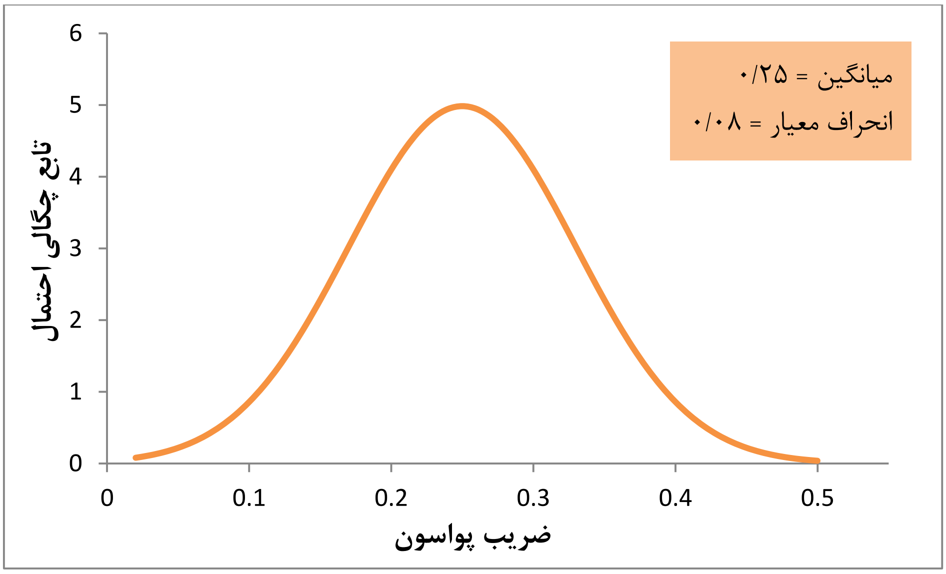
پارامترهای قطعی	علامت اختصاری	مقدار پارامتر
عرض شالوده	B(m)	۳۰
طول شالوده	L(m)	٤۰
عمق جایگزینی شالوده	D(m)	۳
ضخامت طبقه	H(m)	۱۰
تعداد گوشه‌های شالوده	m	٤
ضریب تأثیر	I_1	۰/۰۷۳
ضریب تأثیر	I_2	۰/۰۸۹
ضریب تأثیر	I_3	۰/۹٥

جدول ۲ مشخصات مربوط به متغیرهای تصادفی

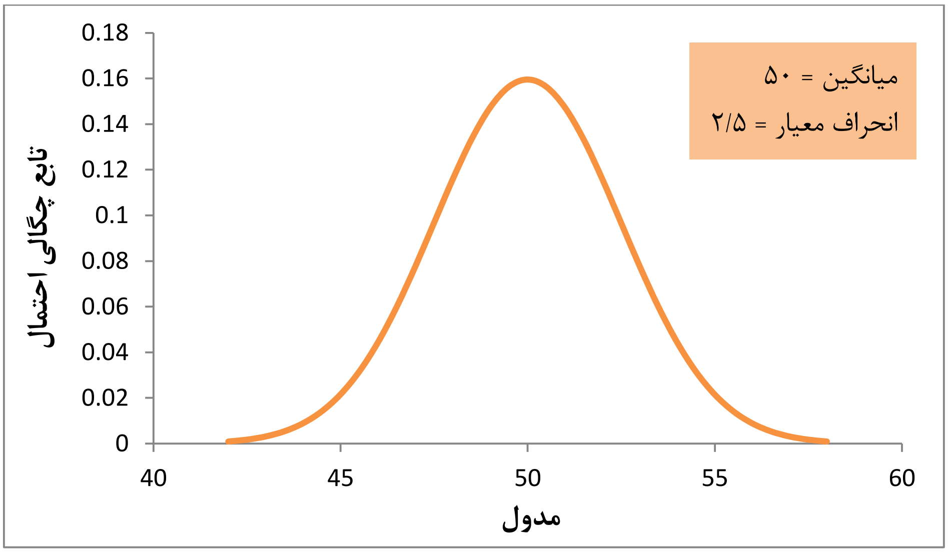
متغیرهای تصادفی	علامت اختصاری	توزیع احتمالاتی	میانگین	انحراف معیار
بار وارده	q_0 (KPa)	نرمال	۲۸۰	٤۰
ضریب پواسون	v	نرمال	۰/۲٥	۰/۰۸
مدول الاستیسیته	E_s (MPa)	نرمال	٥۰	۲/٥



شکل ۳ توزیع چگالی احتمال متغیر بار وارده



شکل ٤ توزیع چگالی احتمال متغیر ضریب پواسون



شکل ٥ توزیع چگالی احتمال متغیر مدول الاستیسیته

روش‌های تحلیل قابلیت اعتمادی چون روش‌های مرتبه‌اول و مرتبه‌دوم، مقدم بر تخمین شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست، نیاز به یک تابع حالت حدی به‌منظور ارزیابی عملکرد تابع اصلی در دامنه‌ی متغیرهای تصادفی دارند. یک رویه‌ی مشخص برای ساخت توابع حالت حدی از توابع صریح، ترکیب آنها با حد آستانه‌ی متغیر مستقل می‌با شد. انتخاب حد آستانه به‌عنوان یک چالش ادامه مسیر قابلیت اعتماد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. میزان نشست شالوده به‌عنوان متغیر مستقل در رابطه‌ی (۱۰) با ترکیب حد آستانه‌ی نشست (۵۰ میلی‌متر)، تشکیل تابع حالت حدی زیر را می‌دهند:

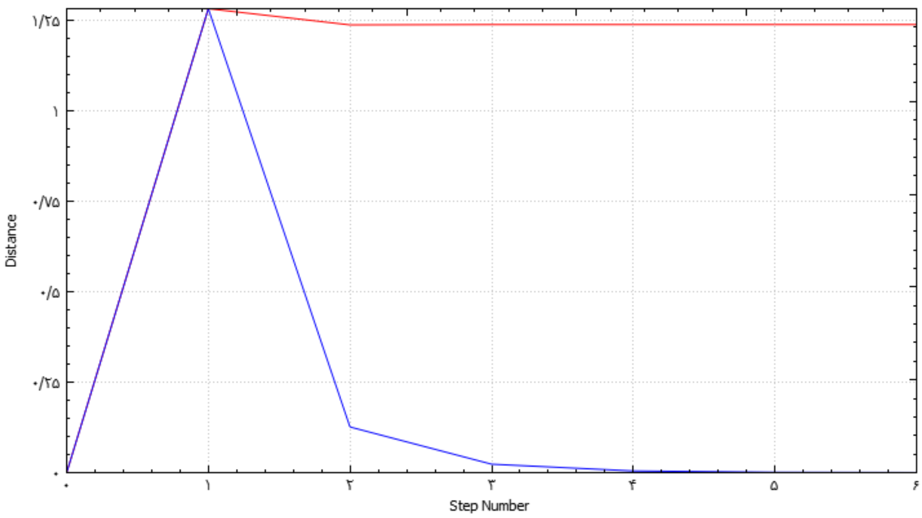
$$G(X) = (\Delta H)_{limit} \quad (۱۱)$$

روش‌های مرتبه‌اول و مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد در نرم‌افزار RT پس از تعریف تابع حالت حدی، الگوریتم

IHLRF را بـه‌منظور یـافتن نقطـه‌ی طراحی بـه‌کـار گرفته‌اســـت. باتوجه به شـــکل (٦) در گام ســـوم از جستجوی این الگوریتم، نقطه‌ی طراحی ارائه شده‌است. در این شـکل نمودار آبی‌رنگ فاصـله‌ی نقطه‌ی مورد تا نقطه‌ی طراحی و نمودار قرمزرنگ، فاصـــله‌ی نقطه‌ی مورد نظر تا مبدأ را نشـــان می‌دهد. درنتیجه فاصـــله‌ی نقطه‌ی برآوردشــده در گام ســوم تا مبدأ، نشـان‌دهنده‌ی شاخص قابلیت اعتماد می‌باشد.

خروجی محاسـبات انجام‌شـده و احتمالات در هر یک از روش‌ها در جدول (۳) آورده شده‌است. احتمالات تخمین زده‌شـده پیرامون حالت شـکسـت در روش‌های مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد و شبیه سازی مونت‌کارلو بسیار به‌هم نزدیک هســتند، درحالی‌که روش مرتبه‌اول قابلیت اعتماد، مقدار احتمال شکست بالاتری را نسبت به سایر روش‌ها تخمین زده‌است. به این دلیل که نتیجه‌ی روش مرتبه‌دوم به شبیه سازی مونت کارلو، به‌عنوان یک روش با دقت بسیار بالا نزدیک‌تر است، می‌توان نتیجه گرفت رویه‌ی حالت حدی $(G(X) = 0)$ در این مطالعه، از حالت خطی خارج اسـت و به سـهمی نزدیک‌تر اسـت؛ بنابراین در مورد این مسئله روش مرتبه‌اول، برای تخمین احتمال شکست با تقریب خطی دچار خطا می‌شود.

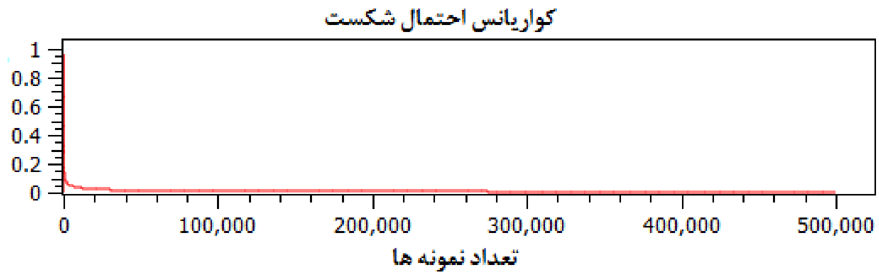
شـبیه‌سـازی مونت‌کارلو برای انجام محاسـبات با دقت بالا، تعداد بسـیار زیادی داده‌ی تصـادفی تولید می‌کند. هرچه تعداد تکرار شـبیه‌سـازی‌ها بیشـتر شـود، احتمال تخمین زده‌شـده به مقدار واقعی آن نزدیک‌تر اسـت. بااسـتفاده از شـکل (۷) که روند هم‌گرایی روش شـبیه‌سـازی مونت‌کارلو به جواب و کاهش تغییرات در تخمین احتمال شکست را نشان می‌دهد، پس از تولید ۲۸۰۰۰۰ داده‌ی تصـادفی از متغیرهای تصـادفی روش مونت کارلو به احتمال ۹/٥٤٪ هم‌گرا می‌شود.



شکل ٦ نمودار هم‌گرایی فاصله تا نقطه‌ی طراحی

جدول ۳ احتمال شکست محاسبه‌شده با روش‌های قابلیت اعتماد

تحلیل قابلیت اعتماد	FORM	SORM	MCS (RT)	MCS (@Risk)
احتمال شکست (٪)	۱۰/۸۱	۹/٥۹	۹/٥٤	۹/٦
شاخص قابلیت اعتماد	۱/۲۳۷	۱/۳۰٥	۱/۳۰۸	–



شکل ۷ نمودار کواریانس احتمال شکست نسبت به افزایش تعداد نمونه‌ها

هم‌چنین شبیه‌سازی مونت‌کارلو با نرم‌افزار @Risk خروجی مشابهی را ارائه می‌دهد. در شکل (۸) تابع توزیع فراوانی G(X) رسم شده‌است. با محاسبه‌ی قسمتی از مساحت زیر نمودار که در سمت منفی نمودار x قرار گرفته‌است، احتمال شکست ٩/٦٪ به‌دست آمده‌است.

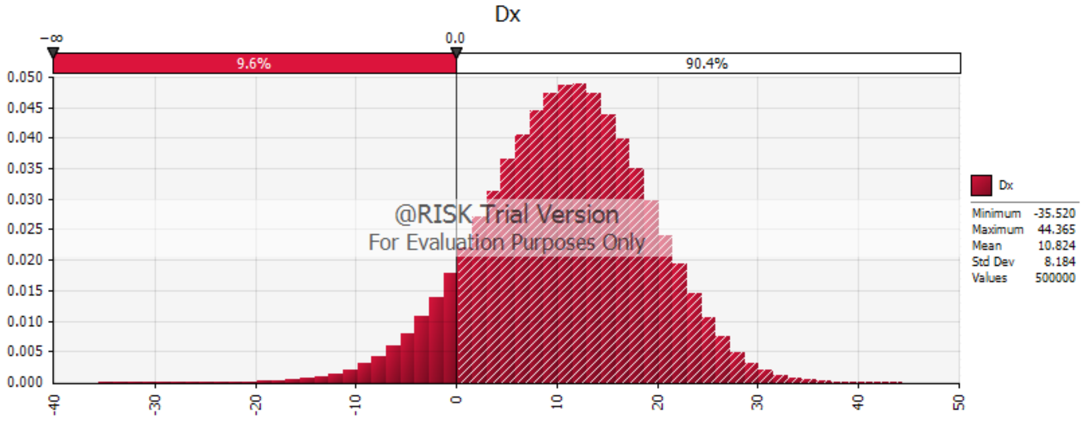
گاهی توابع حالت حدی دارای روابط بسیار پیچیده‌ای هستند که انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای دست یافتن به دقتی بالا زمان و هزینه‌ی محاسباتی بالایی را صرف می‌کند، درحالی‌که روش‌های مرتبه‌اول و مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد، با صرف زمان کمتر به جواب مشابهی می‌رسد. در تحقیق حاضر روش مرتبه‌دوم نسبت‌به روش مرتبه‌اول خروجی دقیق‌تری را از احتمال شکست ارائه می‌دهد و نسبت به شبیه‌سازی مونت‌کارلو هزینه‌ی محاسباتی کمتری دارد.

تحلیل حساسیت متغیرها و تأثیرگذاری آنها با جداول و نمودارهای مربوط، دید مناسبی نسبت‌به اهمیت آنها در برآورد ایمنی سازه‌ها، به طراح می‌بخشد. نتایج آنالیز حساسیت برمبنای قابلیت اعتماد باتوجه به شکل (۹) بیانگر حساسیت بالای شاخص قابلیت اعتماد نسبت‌به متغیر بار واردشده بر شالوده‌ی سطحی می‌باشد. واضح است باری که درنهایت بر شالوده وارد می‌شود در میزان نشست آن تأثیر زیادی دارد، اما کم‌کردن این بار برای بهبود اوضاع شالوده در مواردی ناممکن است. چیزی که اهمیت دارد بهبود بخشیدن پارامترهای محیطی است که متحمل بار می‌شود. در این مورد ضریب پواسون از اهمیت بالاتری نسبت به مدول الاستیسیته برخوردار است. البته نتیجه‌گیری ذکرشده براساس سه بردار اهمیت آلفا، اتا و دلتا ارائه شده‌است.

شکل (۱۰) نشان‌دهنده‌ی اهمیت متغیرها براساس بردارهای اهمیت بتا و کاپا ا ست که اولویت تأثیرگذاری متغیر ها را نسبت به سه بردار اهمیت دیگر تغییر داده‌است.

جدول (٤) به‌طور دقیق‌تر بیانگر اهمیت متغیرها براساس هر بردار اهمیت است. مقادیر اهمیت محاسبه‌شده ممکن است مثبت یا منفی باشند. این علامت در بردارهای مختلف مفهوم متفاوتی از اهمیت متغیرهای مورد بررسی دارد. بردار اهمیت آلفا و کاپا با درنظرگرفتن علامت منفی برای حساسیت متغیرهای مدول الاستیسیته و ضریب پواسون، نشان دادند که این متغیرها از نوع متغیر مقاومت هستند و با افزایش مقادیر آنها احتمال شکست کاهش می‌یابد. به‌علاوه با درنظرگرفتن علامت مثبت برای متغیر بار وارده، ثابت کردند که این متغیر از نوع متغیر بار است و با افزایش مقدار آن احتمال شکست افزایش می‌یابد. باتوجه به این‌که بردارهای اهمیت بتا و دلتا عکس این رویه را دارند، علامت‌ها به‌طور برآوردشده است، اما بردار اهمیت اتا با در نظر گرفتن پراکندگی هر متغیر، حساسیت متغیرها را منفی فرض می‌کند، به این دلیل که با افزایش انحراف معیار متغیرها مقدار احتمال شکت افزایش می‌یابد.

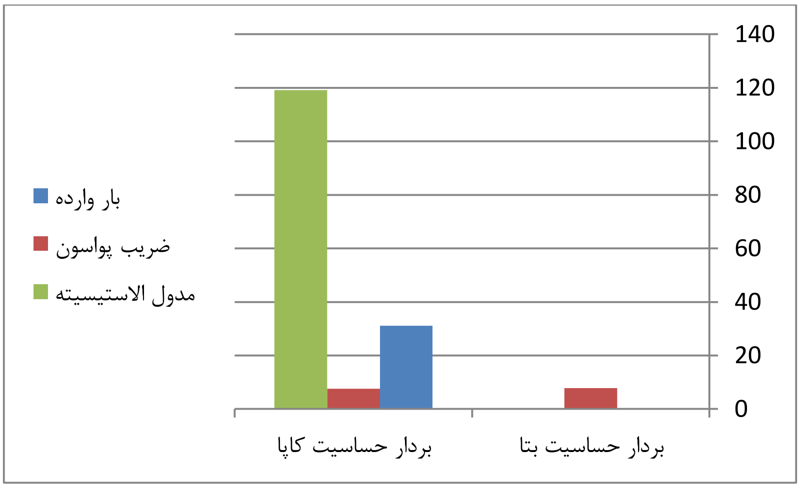
شکل (۱۱) تحلیل حساسیت در نرم‌افزار @Risk را نشان می‌دهد که براساس آن ضریب پواسون نسبت‌به دو متغیر دیگر از اهمیت بالاتری برخوردار است.



شکل ۸ نمودار توزیع فراوانی احتمال شکست در نرم‌افزار @Risk



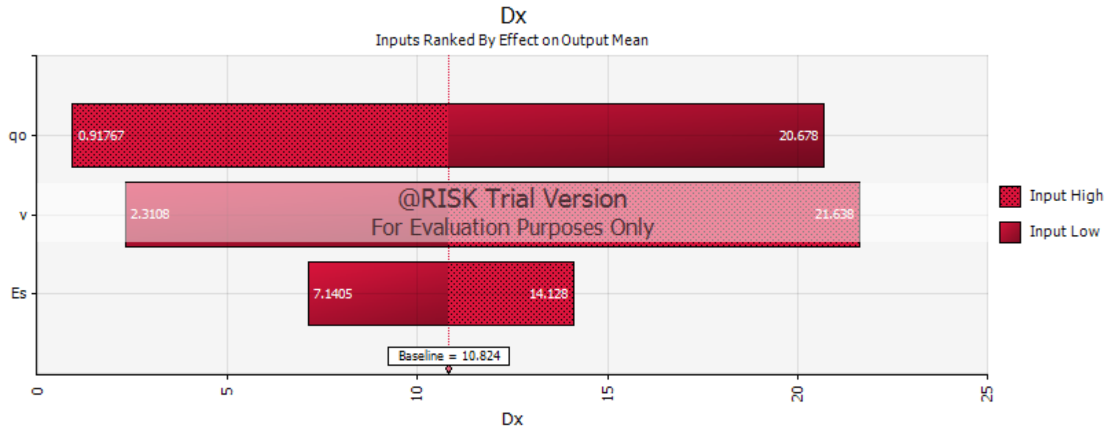
شکل ۹ نمودار بردارهای حساسیت متغیرهای تصادفی



شکل ۱۰ نمودار بردارهای حساسیت متغیرهای تصادفی

جدول ٤ بردارهای حساسیت متغیرهای تصادفی

نوع بردار حساسیت	بار وارده	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته
α	۰/۷۲۷۸	−۰/٦۲۰۱	−۰/۲۹۲۸
η	−۰/٦٥٥۲	−۰/٤۷٥٦	−۰/۱۰٦۰
β	−۰/۰۱۸۲	۷/۷٥۲	۰/۱۱۷۱
δ	−۰/۷۲۷۸	۰/٦۲۰۱	۰/۲۹۲۸
κ	۳۱/۰۸	−۷/٥٤۲	−۱۱۹/۲



شکل ۱۱ تحلیل حساسیت متغیرهای تصادفی برمبنای قابلیت اعتماد

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تحلیل قابلیت اعتماد نشست آنی یک شالوده‌ی مستطیلی بااستفاده از روش‌های مرتبه‌اول و مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد و شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شد. بررسی‌ها نشان داد که تحلیل‌های انجام‌شده با روش‌های نام‌برده با اختلاف نتایج بسیار کمی، بالا بودن احتمال شکست تخمین زده‌شده برای نشست شالوده‌ی سطحی موردنظر را نسبت به احتمال شکست قابل قبول در زمینه‌ی مهندسی، تأیید می‌کند. همچنین مقایسه‌ی احتمال شکست محاسبه‌شده از روش‌ها نشان داد، باتوجه به نتیجه‌ی مشابه روش مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد به شبیه‌سازی مونت‌کارلو، که دقت بسیار بالایی در تخمین احتمالات دارد، رویه‌ی حالت حدی $(G(X) = 0)$ به سهمی نزدیک‌تر است. به همین دلیل روش مرتبه‌اول با تقریب خطی از رویه‌ی حالت حدی را با خطا مواجه می‌کند. به این علت که در شبیه‌سازی مونت کارلو برای کاهش تغییرات در تخمین احتمال شکست و رسیدن به جواب با دقت بالا نیاز به تولید تعداد زیادی داده‌ی تصادفی و تکرار شبیه‌سازی $(n = 280000)$ وجود دارد. برای مسئله‌ی حاضر روش مرتبه‌دوم قابلیت اعتماد با هزینه‌ی محاسباتی بسیار کمتر، جایگزین مناسبی برای شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌باشد.

تحلیل حساسیتی که درمورد متغیرهای تصادفی و بااستفاده از بردارهای مختلف انجام شد، متغیرها را ازنظر اهمیت و تأثیرگذاری بر میزان نشست شالوده، اولویت‌بندی کرده‌است. بار وارده‌شده بر شالوده‌ی سطحی دارای بیشترین اهمیت است و تغییر آن تأثیر زیادی بر نشست دارد. پس از این متغیر ضریب پواسون که از خصویات محیطی مسئله به‌شمار می رود دارای اهمیت بیشتری است که با سعی در افزایش مقدار این متغیر در

محیط مورد نظر، احتمالات محاسبه‌شده در باب ایمنی را بهبود می‌بخشد.

مراجع

1. Casagrande, A. and Carillo, N., "Shear failure of anisotropic materials", *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 4, pp. 74-81, (1944).
2. Zeng, P., Jimenez, R., and Li, T., "An efficient quasi-Newton approximation-based SORM to estimate the reliability of geotechnical problems", *Computers and Geotechnics*, Vol. 76, No. pp. 33-42, (2016).
3. Zhang, S., Zhong, L., and Xu, Z., "Reliability of foundation pile based on settlement and a parameter sensitivity analysis", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2016, No. 1 (2016).
4. Ahmed, A. Y., Nowak, A. S., and Szerszen, M. M., *Reliability Analysis for Settlement of Shallow Bridge Foundations*, in *IFCEE 2018*. Vol. 1, Pp.463-473, (2018).
5. Haldar, A. and Mahadevan, S., *Probability, reliability, and statistical methods in engineering design*. 2000: John Wiley.
6. Li, H.-Z. and Low, B. K., "Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field", *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, No. 1-2, pp. 50-58, (2010).
7. Sivakumar Babu, G., Srivastava, A., and Murthy, D. S., "Reliability analysis of the bearing capacity of a shallow foundation resting on cohesive soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, No. 2, pp. 217-223, (2006).
8. Griffiths, D. and Fenton, G. A., *The random finite element method (RFEM) in slope stability analysis*, in *Probabilistic methods in geotechnical engineering*. 2007, Springer. p. 317-346.
9. Griffiths, D. V. and Fenton, G., "Risk assessment in geotechnical engineering", *John wiley&Sons, Inc*, Vol. 1, No. 1, pp. 381-400, (2008).
10. Li, D., et al., "A system reliability approach for evaluating stability of rock wedges with correlated failure modes", *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, No. 8, pp. 1298-1307, (2009).
11. Jha, S. K. and Suzuki, K., "Reliability analysis of soil liquefaction based on standard penetration test", *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, No. 4, pp. 589-596, (2009).
12. Xue, J. and Nag, D., "Reliability analysis of shallow foundations subjected to varied inclined loads", *Geotechnical Safety and Risk. ISGSR 2011*, Vol. 1, No. 1, pp. 377-384, (2011).
13. Ching, J., et al., "Reliability-based design for allowable bearing capacity of footings on rock masses by considering angle of distortion", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 48, No. 5, pp. 728-740, (2011).
14. Chan, C. L. and Low, B. K., "Probabilistic analysis of laterally loaded piles using response

surface and neural network approaches", *Computers and Geotechnics*, Vol. 43, No. pp. 101-110, (2012).

15. Zevgolis, I. E. and Bourdeau, P. L., "Reliability and redundancy of the internal stability of reinforced soil walls", *Computers and Geotechnics*, Vol. 84, No. pp. 152-163, (2017).
16. Johari, A. and Sabzi, A., "Reliability analysis of foundation settlement by stochastic response surface and random finite-element method", *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 2741-2751, (2017).
17. Nazarzadeh, M. and Sarbishe-ee, S., "Probabilistic Analysis of Shallow Foundation Settlement considering Soil Parameters Uncertainty Effects", *Open Journal of Geology*, Vol. 7, No. 05, pp. 731, (2017).
18. Shakir, R. R., "Probabilistic-based analysis of a shallow square footing using Monte Carlo simulation", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 22, No. 1, pp. 313-333, (2019).
19. Park, H. and West, T., "Development of a probabilistic approach for rock wedge failure", *Engineering Geology*, Vol. 59, No. 3-4, pp. 233-251, (2001).
20. Das, B., *Principles of Foundation Engineering 8th Ed*. Instructor. Vol. 201605. 2014: Nelson.
21. Rowe, R. and Booker, J., "The elastic displacements of single and multiple underream anchors in a Gibson soil", *Geotechnique*, Vol. 31, No. 1, pp. 125-142, (1981).
22. Chan, C. L. and Low, B. K., "Practical second- order reliability analysis applied to foundation engineering", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 36, No. 11, pp. 1387-1409, (2012).